



**POLITECHNIKA  
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI  
I AUTOMATYKI

Gdańsk 30.10.2019

**Raport końcowy z prac zrealizowanych w ramach  
projektu nr RX-15/4/2017 zgodnie z umową  
WFOŚ/D/201/14/2018**

Opracował: dr inż. Krzysztof Blecharz, kierownik zespołu badawczego

Skład zespołu badawczego:

dr hab. inż. Dariusz Karkosiński

dr inż. Filip Kutt

mgr inż. Michał Pacholczyk

## Spis treści

1. Opis projektu .....	3
2. Modelowanie i projektowanie turbiny oraz generatora .....	4
a. Modelowanie i projektowanie turbiny.....	4
b. Modelowanie i projektowanie generatora .....	7
3. Budowa prototypu turbiny wiatrowej.....	9
4. Tunel aerodynamiczny .....	12
5. Badania laboratoryjne prototypu konstrukcji generatora i turbiny.....	18
a) Badanie generatora .....	18
b) Badanie turbiny wiatrowej .....	20
6. Podsumowanie i wnioski .....	23
Spis Załączników .....	27

# 1. Opis projektu

Dwuwirikowa turbina wiatrowa CRWT (ang. Counter Rotating Wind Turbine) to silnik wiatrowy z dwoma niezależnymi, przeciwbieżnie obracającymi się wirnikami umieszczonymi w wspólnej osi. Koncepcja tego typu turbiny zakłada wykorzystanie części energii wiatru, która tracona jest bezpowrotnie po przejściu strugi powietrza przez pojedynczy wirnik. Klasyczna teoria Betz'a została rozwinięta przez Newman'a, który wykazał, że wykorzystując drugi wirnik umieszczony w osi obrotu da się zwiększyć współczynnik wykorzystania wiatru  $C_p$  z 0,593 dla pojedynczego wirnika (rzeczywiste turbiny jednowirnikowe osiągają znacznie niższe wartości z zakresu od 0,4 do 0,5) do 0,64 dla turbiny CRWT. Wyniki badań nad turbinami typu CRWT raportowane w literaturze potwierdzają wzrost mocy turbiny rzędu 10%. Generatory elektryczne wykorzystywane we współczesnych dużych elektrowniach wiatrowych są często sprzęgnięte z wirnikiem turbiny przez przekładnię mechaniczną zwiększającą prędkość obrotową wału generatora. Przekładnie są jednak częściami podatnymi na awarię i kosztownymi w wymianie. W proponowanym rozwiązaniu można wyeliminować ten element dzięki zastosowaniu w generatorze dwóch niezależnie wirujących wirników i stojana połączonego niezależnie z poszczególnymi wirnikami. Zwiększona prędkość względna magnesu i twornika maszyny pozwala również na redukcję wymiarów prąducnicy oraz zastosowanie mniejszej ilości biegunów magnetycznych. Do wykorzystania w turbinach CRWT idealnie nadaje się generator tarczowy, coraz częściej wykorzystywany w tradycyjnych elektrowniach. Generator tarczowy charakteryzuje się prostą konstrukcją i wysoką sprawnością. Łatwo zastosować w nim koncepcję wirującej magnesu i twornika, a niewielkie rozmiary wzdłużne umożliwiają zamontowanie wirników wiatrowych odpowiednio blisko. Możliwa jest rezygnacja ze stosowania rdzenia w stojanie. W maszynach bezrdzeniowych praktycznie nie występuje moment zaczepowy utrudniający start turbiny przy niskich prędkościach wiatru. Generatory tarczowe z magnesami trwałymi mogą pracować w sieci wydzielonej.

Celem projektu badawczo-rozwojowego było opracowanie prototypu dwuwirikowej, bezprzekładniowej elektrowni wiatrowej z trójfazowym, bezrdzeniowym generatorem tarczowym z magnesami trwałymi o wirującym tworniku i magnesu o mocy do 3 kW. Wykonanie i opracowanie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem zmodyfikowanej konstrukcji tunelu aerodynamicznego.

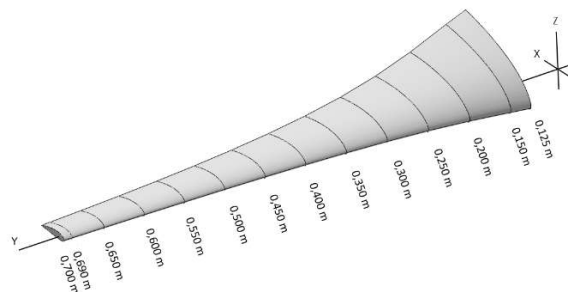
Projekt podzielono na 3 zasadnicze części:

- A. Modelowanie i projektowanie turbiny oraz generatora;
- B. Budowa prototypu;
- C. Badania prototypu.

## 2. Modelowanie i projektowanie turbiny oraz generatora

### a. Modelowanie i projektowanie turbiny

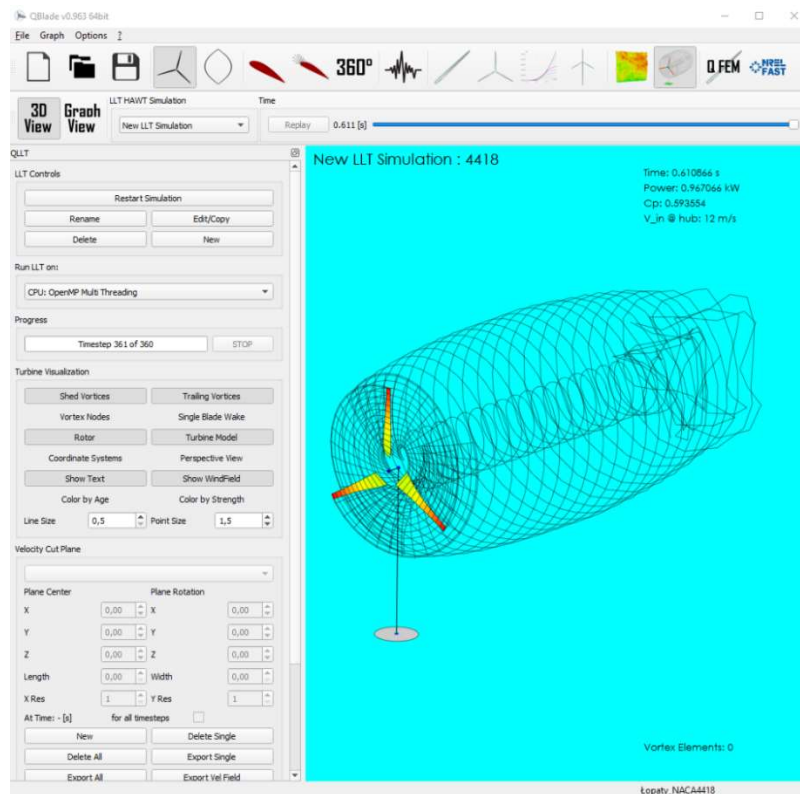
Modelowanie turbiny wiatrowej zostało wykonane z wykorzystaniem zmodyfikowanej teorii elementu płata BEMT (ang. Blade Element Method Theory) oraz technik Numerycznej Mechaniki Płynów (CFD). Do obliczeń z wykorzystaniem technik CFD użyto oprogramowanie ANSYS Fluent, Open FOAM. Do opracowania projektu geometrii łopaty turbiny wiatrowej wykorzystano darmowy program komputerowy opracowany przez niemiecki instytut Hermann Föttinger Institute na Politechnice w Berlinie. Program QBlade charakteryzuje się przejrzystością interfejsu komunikacyjnego, łatwością obsługi, a jego wartości użytkowe zostały potwierdzone przez wyniki badań laboratoryjnych. Maksymalna średnica zewnętrzna projektowanej turbiny wiatrowej została zdeterminowana rozmiarami tunelu aerodynamicznego będącego wyposażeniem laboratorium Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Dla zapewnienia optymalnych warunków pomiarowych w czasie trwania badań laboratoryjnych średnicę zewnętrzną wirnika turbiny przyjęto równą 1.4m. Następnymi krokami było określenie optymalnej geometrii płatów łopaty turbiny oraz kątów ich ustawienia, dobór profili aerodynamicznych oraz odległość pomiędzy wirnikami. Badania symulacyjne z zastosowaniem narzędzi programowych pozwoliły oszacować maksymalną moc turbiny i prędkości obrotowe poszczególnych wirników. Do opracowania geometrii płata łopaty wykorzystano profil aerodynamiczny NACA4418. Na Rys. 1 pokazano przykładowy rzut aksjonometryczny pojedynczej łopaty turbiny z uwzględnieniem rozmieszczenia poszczególnych profili względem układu współrzędnych, którego początek umieszczono w środku geometrycznym wirnika.



Rys. 1 Rzut aksjonometryczny projektu łopaty turbiny wiatrowej

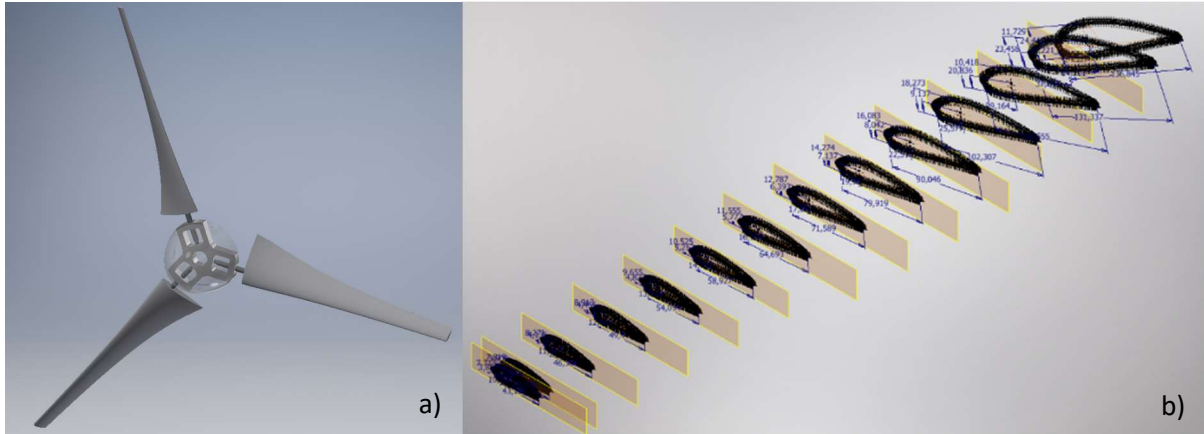
Dla tak opracowanej geometrii przeprowadzono badania symulacyjne z zastosowaniem programu QBlade. Zastosowanie programu umożliwiło wyznaczenie wszystkich charakterystycznych parametrów aerodynamicznych turbiny wiatrowej z uwzględnieniem przyjętego zakresu zmian wiatru. Wyznaczono również m.in. charakterystyki statyczne zależności zmian mocy w funkcji prędkości wiatru, zależności zmian mocy w funkcji zmiany kąta natarcia łopaty, zależności zmiany współczynnika mocy w funkcji zmian wyróżnika szybkobieżności. Na Rys. 2 pokazano zrzut ekranu z programu QBlade obrazujący fragment analizy turbulencji strugi powietrza powstałych za płaszczyzną wirnika.

W trakcie prac opracowano trzy konstrukcje geometryczne wirników różniące się liczbą i geometrią łopat, odpowiednio wirniki z liczbą 2,3 i 4 łopat oraz współczynnikami wyróżników szybkobieżności (ang. Tip Speed Ratio), odpowiednio TSR równe 6, 5 i 4. Tak zaprojektowane wirniki turbiny wiatrowej pozwalały na analizę działania silnika wiatrowego dla różnych konfiguracji geometrycznych.



Rys. 2 Wizualizacji turbulencji (zrzut ekranu z programu QBlade)

W celu przygotowania dokumentacji technicznej dla zewnętrznego wykonawcy do wytworzenia prototypu łopat opracowano trójwymiarowe modele łopat, piast i kołpaków z zastosowaniem zaawansowanego oprogramowania do modelowania trójwymiarowego Autodesk Inventor 2019 Professional. Na Rys. 3 pokazano przykładowy model wirnika turbiny oraz etap tworzenia modelu łopaty wirnika.



Rys. 3 Trójwymiarowy model pojedynczego wirnika turbiny wiatrowej (a), etap konstrukcji modelu łopaty (b)

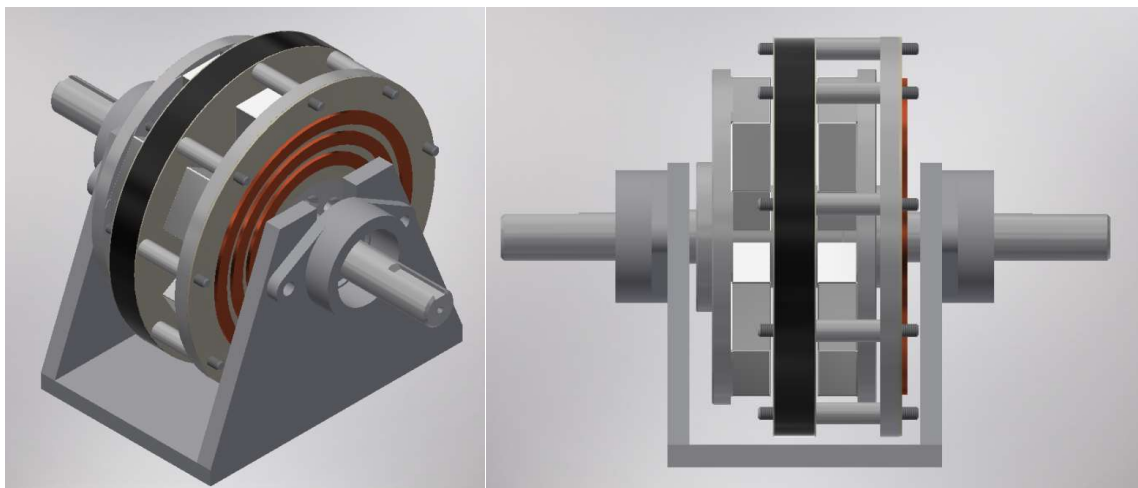
Analizę właściwości aerodynamicznych pojedynczego wirnika turbiny wiatrowej można w szybki sposób przeprowadzić z zastosowaniem programu QBlade. Jednakże nie jest możliwe wykonanie analizy i symulacji układu dwóch wirników umieszczonych współosiowo z zastosowaniem tego programu. Dlatego analizę aerodynamiki opracowanej konstrukcji turbiny dwuwirnikowej przeprowadzono z zastosowaniem programu Open FOAM w którym mechanizm obliczeniowy oparto na metodzie ALM (Actuator Line Model). Wykonanie obliczeń symulacyjnych, z uwagi na zapotrzebowanie na dużą moc obliczeniową, zostało wykonane na superkomputerze Tryton należącym do Centrum Informatycznego TASK w Gdańsku. Obliczenia symulacyjne dotyczyły studium parametrycznego dla modelu turbiny dwuwirnikowej dla różnych prędkości obrotowych poszczególnych wirników oraz różnych odległości pomiędzy płaszczyznami wirowania obu wirników. Łącznie przebadano 245 konfiguracji modelu turbiny. Obliczenia dla pojedynczej konfiguracji wykonywane były na 768 rdzeniach obliczeniowych typu Intel Xenon Processor E5v3 o taktowaniu 2.3 GHz. Łączny czas wszystkich przeprowadzonych równolegle obliczeń numerycznych wyniósł 1700 h. Tak przygotowane wyniki obliczeń numerycznych zajęły w przybliżeniu 1TB obszaru roboczy dysku twardego.

Opracowane graficznie wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane zostały na forum publicznym na konferencjach naukowych oraz opisane w publikacjach naukowych będących załącznikiem do bieżącego raportu.

## b. Modelowanie i projektowanie generatora

W przyjętej konstrukcji turbiny dwuwirnikowej niezbędne jest przetwarzanie energii kinetycznej ruchu obrotowego obu wirników na energię elektryczną. Przetwarzanie to można uzyskać stosując dwa najbardziej popularne rozwiązania, przy czym w każdym konieczne jest zastosowanie wzbudzenia w postaci magnesów trwałych. W pierwszym rozwiązaniu możliwe jest zastosowanie dwóch niezależnych wolnoobrotowych generatorów połączonych oddzielnie do każdego z wirników turbiny. Rozwiązanie to ma istotną wadę z uwagi na niższą sprawność przetwarzania energii, straty energii występują w obu generatorach. Drugie rozwiązanie przyjęte w projekcie to zastosowanie dwuwirnikowego generatora. W konstrukcji przyjętego rozwiązania generatora założono zastosowanie dwóch wałów obracających się w przeciwnych kierunkach. Pierwszy wał maszyny połączony jest z twornikiem, natomiast drugi wał połączono z magneśnicą wykonaną w postaci magnesów stałych przymocowanych do dwóch połączonych mechanicznie stalowych tarcz. Oba wały mogą obracać się niezależnie względem siebie. Zaletą takiego rozwiązania jest brak konieczności stosowania przekładni mechanicznej podnoszącej prędkość kątową wirowania generatora, a tym samym zwiększenie sprawności przetwarzania energii mechanicznej. Na etapie założeń projektowych przyjęto moc nominalną generatora, przy znamionowej prędkości wirowania wałów równą 500 W dla napięcia przemiennego 3x400V. Wartość mocy znamionowej została przyjęta na podstawie wymiarów geometrycznych turbiny wiatrowej.

Na potrzeby wykonania prototypu generatora przez zewnętrznego wykonawcę oraz realizacji badań symulacyjnych opracowano pełną dokumentację techniczną. Trójwymiarowy model komputerowy generatora został opracowany z zastosowaniem programu Autodesk Inventor 2019 Professional. Na Rys. 4 pokazano model generatora tarczowego z dwoma niezależnie obracającymi się wałami.

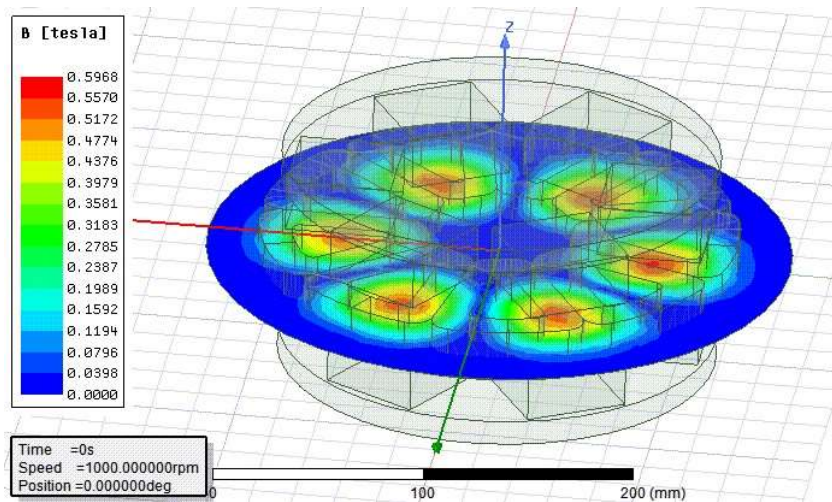


Rys. 4 Model generatora tarczowego - rzut aksjonometryczny, widok z boku.

Obliczenia polowo-obwodowe generatora tarczowego zostały wykonane z zastosowaniem dwóch programów, jednego komercyjnego pakiet ANSYS oraz jednego darmowego FEMM 4.2 z tzw. otwartym kodem źródłowym. Oba programy komputerowe do obliczeń rozkładu pola elektromagnetycznego

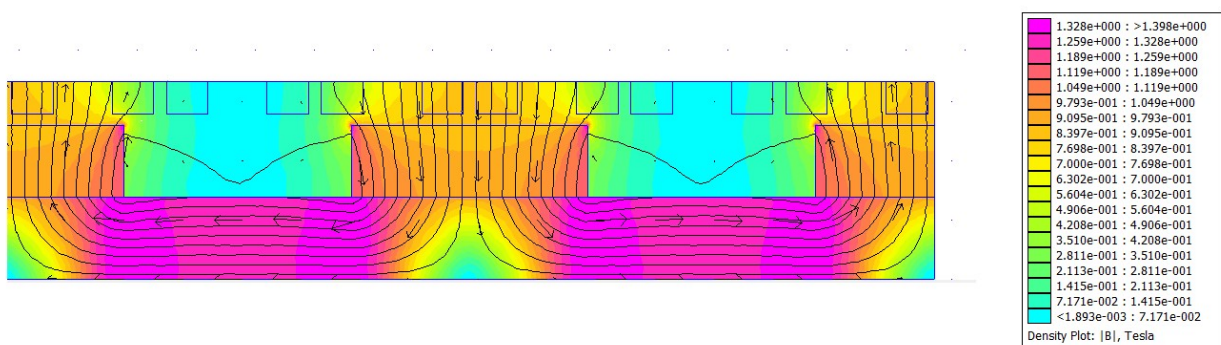
wykorzystują metodę elementów skończonych. Zastosowanie programu ANSYS umożliwiło analizę rozkładu pola magnetycznego maszyny w przestrzeni trójwymiarowej. Wykorzystanie program FEMM 4.2, po przyjęciu stosownych założeń upraszczających i sprowadzeniu geometrii maszyny do współrzędnych ortogonalnych, również pozwoliło na analizę rozkładu pola w obwodzie magnetycznym maszyny. Uzyskane wyniki symulacyjne są zbieżne, a różnice wynikają z przyjętych uproszczeń. Jednakże zastosowanie programu do obliczeń w przestrzeni dwuwymiarowej nie wymaga komputera o dużej mocy obliczeniowej i na potrzeby tworzenia prototypu doskonale przyspiesza proces projektowania.

Na Rys. 5 pokazano przykładowy rozkład indukcji w szczelinie powietrznej generatora wygenerowany z zastosowaniem programu ANSYS. Maksymalna wartość indukcji w szczelinie maszyny nie przekroczyła dla pokazanego przypadku wartości 0.6 T.



Rys. 5 Rozkład indukcji w szczelinie powietrznej generatora tarczowego (ANSYS)

Przeprowadzone badania umożliwiły dobór optymalnej liczby par biegunów magnetycznych oraz geometrii magnesów trwałych na wirniku oraz cewek na stojanie. Przeanalizowany został również rozkład pola w szczelinie powietrznej i kształt przebiegu indukowanego napięcia.

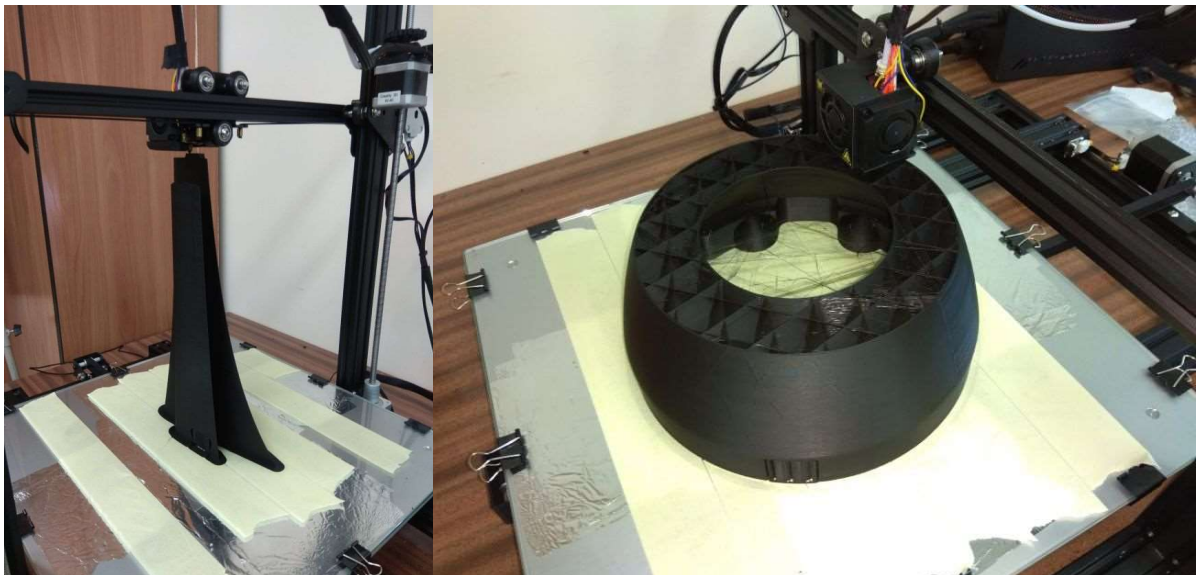


Rys. 6 Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej generatora (FEMM 4.2)



### 3. Budowa prototypu turbiny wiatrowej

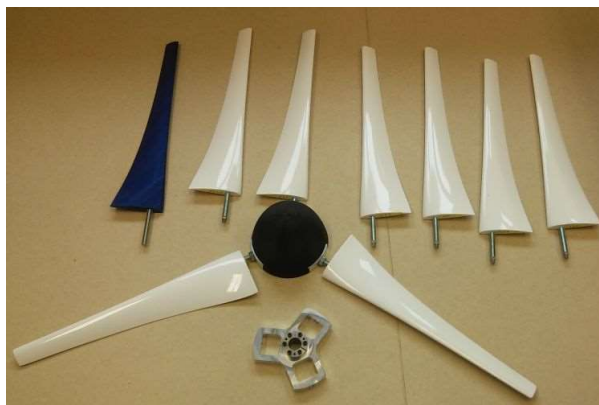
Prototyp konstrukcji dwuwirnikowej turbiny wiatrowej składa się szereg elementów, których poszczególne składniki były zaprojektowane przez uczestników projektu, natomiast wykonanie większości prac zostało zlecone do zewnętrznych podmiotów gospodarczych. Po zaprojektowaniu modelu łopat przystąpiono do opracowania prototypów. W pierwszej kolejności zamówiono usługę druku trójwymiarowego łopaty wirnika w zewnętrznej firmie, z uwagi na brak możliwości wykonania wydruku własnymi siłami. W trakcie trwania projektu na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki zakupiono z innych środków profesjonalną drukarkę o dużym polu roboczym, co umożliwiło szybsze i samodzielne wykonanie dalszych prototypów elementów pomocniczych i konstrukcyjnych turbiny wiatrowej. Przeżytyło się to, tym samym na obniżenie kosztów realizacji projektu, które sprowadzały się do zakupu materiałów eksploatacyjnych do wydruków. Poniżej na Rys. 7 pokazano proces wydruku prototypu łopaty oraz kołpaka osłonowego piasty wirnika głównego turbiny wiatrowej.



*Rys. 7 Widok wydruku prototypu łopaty i kołpaka wykonany w technice druku 3D*

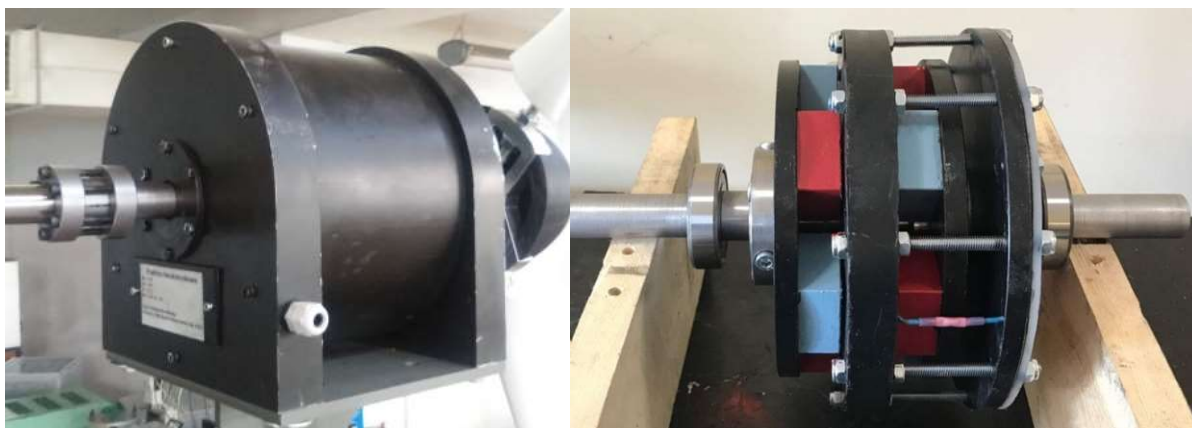
Piasty obu wirników opracowano w trzech wersjach konstrukcyjnych umożliwiających montaż od 2 do 4 łopat w zależności od zastosowanych profili łopat. Piasty zostały wykonane ze stopu aluminium.

Po analizie i badaniu prototypów łopat wykonanych techniką druku 3D zlecono wykonanie 3 kompletów łopat w technice laminowania włókien szklanych. Zastosowanie tej techniki pozwoliło na budowę łopat charakteryzujących się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz niską masą własną oraz precyzją wykonania. Na rysunku Rys. 8 pokazano pojedynczy wirnik wiatraka z kompletem łopat oraz piastą i kołpakiem.



*Rys. 8 Widok ogólny pojedynczego wirnika z kompletem łopat oraz piasta i kołpakiem*

Jednym z kluczowych elementów turbiny dwuwirnikowej jest generator o specjalnej konstrukcji mechanicznej umożliwiający niezależny względem siebie obrót obu wałów na których zamontowano wirniki turbiny obracające się w przeciwnych kierunkach. Dzięki takiej konstrukcji uzyskano większą wartość prędkości obrotowej względnej pomiędzy wirującymi magnesami a twornikiem generatora. Konstrukcja generatora, ze względu na swoją specyficzną konstrukcję mechaniczną, wymagała znalezienia wykonawcy zdolnego do budowy prototypu z zachowaniem należytej staranności i precyzji. Ten etap projektu okazał się dość problematyczny i czasochłonny ze względu na trudności ze znalezieniem wykonawcy. Konstrukcję generatora wykonała firma EMS Electric Motors Service Sp. z o.o. Na rysunku Rys. 9 zaprezentowano zdjęcia konstrukcji generatora w całości oraz ze zdemontowaną częścią osłonową zabezpieczającą magnesy osadzone na wirniku.



*Rys. 9 Widok konstrukcji prototypu generatora*

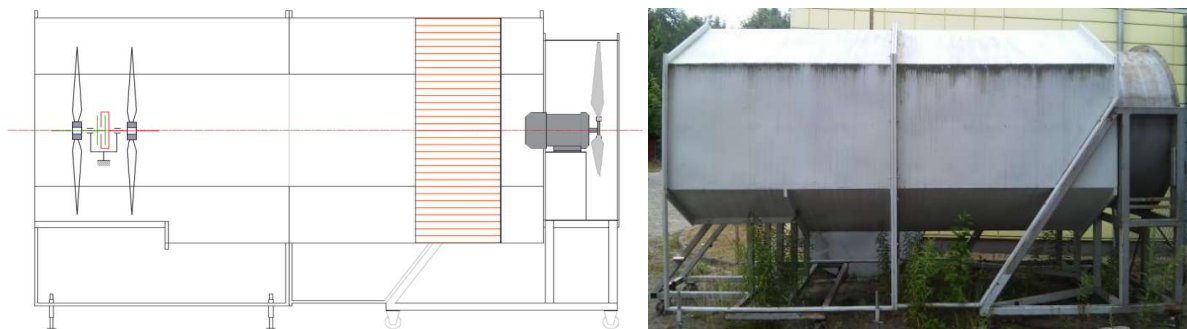
Kolejnym etapem projektu było opracowanie konstrukcji nośnej, stelaża na którym zamontowano generator wraz z dwoma wirnikami. Konstrukcja nośna została tak zaprojektowana, aby możliwa była łatwa zamiana odległości pomiędzy dwoma wirnikami turbiny wiatrowej. Kolejnymi ważnymi cechami konstrukcji jest duża stabilność mechaniczna, mobilność oraz łatwość rozbudowy na potrzeby dalszych badań i montażu czujników zewnętrznych. Widok konstrukcji turbiny dwuwirnikowej zamontowanej na stelażu mobilnym został pokazany na Rys. 10., w lewej części rysunku pokazano także wirtualny model konstrukcji opracowany w programie Autodesk Inventor 2019 Professional.



*Rys. 10 Widok prototypu turbiny dwuwirnikowej, model 3D oraz prototyp*

## 4. Tunel aerodynamiczny

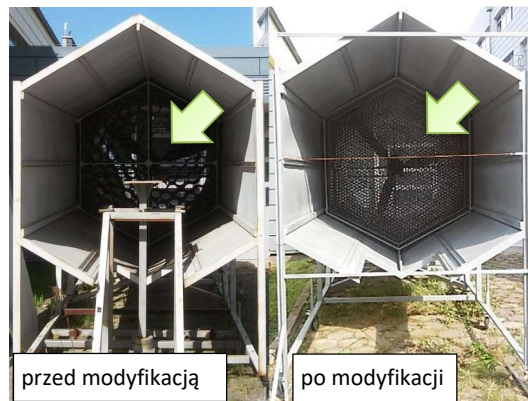
Do badania właściwości aerodynamicznych opracowanej konstrukcji turbiny wiatrowej w warunkach laboratoryjnych niezbędny jest tunel aerodynamiczny będący na wyposażeniu laboratorium Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (WEiA PG). Konstrukcja tunelu została opracowana wiele lat temu na potrzeby realizacji badań wykonywanych w ramach licznych grantów badawczych. Tunel aerodynamiczny będący na wyposażeniu laboratorium WEiA jest tunelem typu otwartego. Na wylocie tunelu możliwe jest uzyskanie przepływu strumienia powietrza w zakresie od 0 do 12 m/s. W pierwotnej formie konstrukcji tunelu przepływ powietrza wymuszany w świetle tunelu charakteryzował się prędkością do 12 m/s oraz niekorzystnym kształtem profilu prędkości przepływu w świetle tunelu, a także dużymi turbulencjami. W tunelu nie było zamontowanego żadnego systemu pomiarowego umożliwiającego zdalną, bezpieczną rejestrację danych na obiekcie umieszczonym u wylotu tunelu. Fakt ten znacznie utrudniał prace badawcze. Dlatego w celu poprawy warunków pomiarowych oraz zwiększenia bezpieczeństwa obsługi wykonano projekt modernizacyjnych konstrukcji tunelu. Na Rys. 11 pokazano przekrój poprzeczny konstrukcji oraz fotografię tunelu aerodynamicznego zlokalizowanego na terenie Politechniki Gdańskiej przed modernizacją.



Rys. 11 Widok tunelu aerodynamicznego przed modernizacją konstrukcji

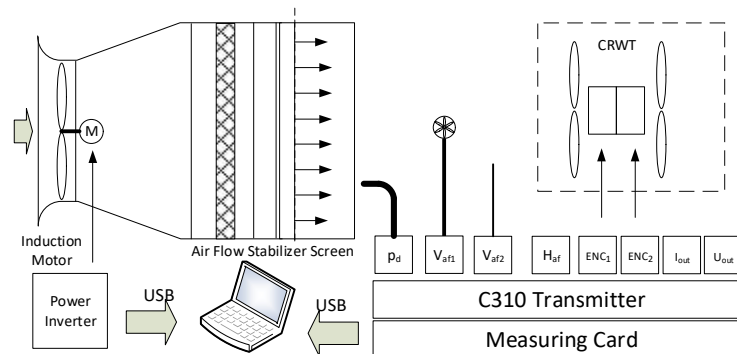
Projekt modernizacji obejmował dwa obszary. Pierwszy obszar to poprawienie warunków pomiarowych na wylocie tunelu polegające na uspokojeniu silnie zaburzonego przepływu generowanego przez główny wentylator w celu otrzymania możliwie laminarnego przepływu strumienia powietrza. Drugi obszar to zautomatyzowanie pomiarów i poprawa bezpieczeństwa personelu obsługującego badania. Prace modernizacyjne z zakresie pierwszego obszaru działań zostały zlecone zewnętrznej firmie. Zakres prac obejmował wymianę elementów konstrukcji prostownicy strugi w komorze wewnętrznej, doposażenie tunelu o dodatkowe ekrany siatkowe tłumiące turbulencję, ochronę antykorozyjną konstrukcji stalowej oraz montaż dodatkowych kół transportowych. W załączniku X zamieszczono rysunki projektowe zmian konstrukcji tunelu. Zastosowany sposób montażu siatek ekranów oraz prostownicy pozwala na płynną regulację położenia ekranów względem płaszczyzny wentylatora głównego, umożliwiając tym samym wpływ na parametry uzyskiwanych przepływów. W pierwotnej konstrukcji prostownica strumienia była wykonana w postaci 100 rur PCV o średnicy 160 mm i długości 1000 mm ułożonych we wnętrzu tunelu w płaszczyźnie prostopadłej do osi śmigła wentylatora. Na etapie modernizacji prostownicy grubościenne rury o średnicy 160 mm zostały zastąpione rurkami cienkościennymi o średnicy 50mm i długości 300mm w liczbie 2000 sztuk. Zmiany te widoczne są na

prezentowanych poniżej zdjęciach. Na Rys. 12 pokazano widok wylotu tunelu przed i po wykonaniu prac modyfikacyjnych. Na zdjęciach zaznaczono modyfikacje prostownicy strugi powietrza polegającą na zastosowaniu rurek o mniejszej średnicy przepływu.



Rys. 12 Widok wylotu tunelu przed i po modyfikacji prostownicy strugi powietrza

Drugi obszar modernizacji polegał na poprawie warunków pomiarowych poprzez doposażenie tunelu w system pomiarowy rejestrujący dane pomiarowe w trybie bezpośrednim oraz przemiennik częstotliwości do zasilania głównego silnika wentylatora. Zastosowanie nowoczesnego systemu pomiarowego z zestawem precyzyjnych sond do pomiaru wielkości fizycznych strumienia powietrza wraz nowym falownikiem znacznie podniosło użyteczność tunelu i precyzję wyników uzyskiwanych w trakcie realizacji badań z zastosowaniem tunelu. Struktura stanowiska laboratoryjnego z automatycznym systemem rejestracji danych pomiarowych została pokazana na Rys. 13.

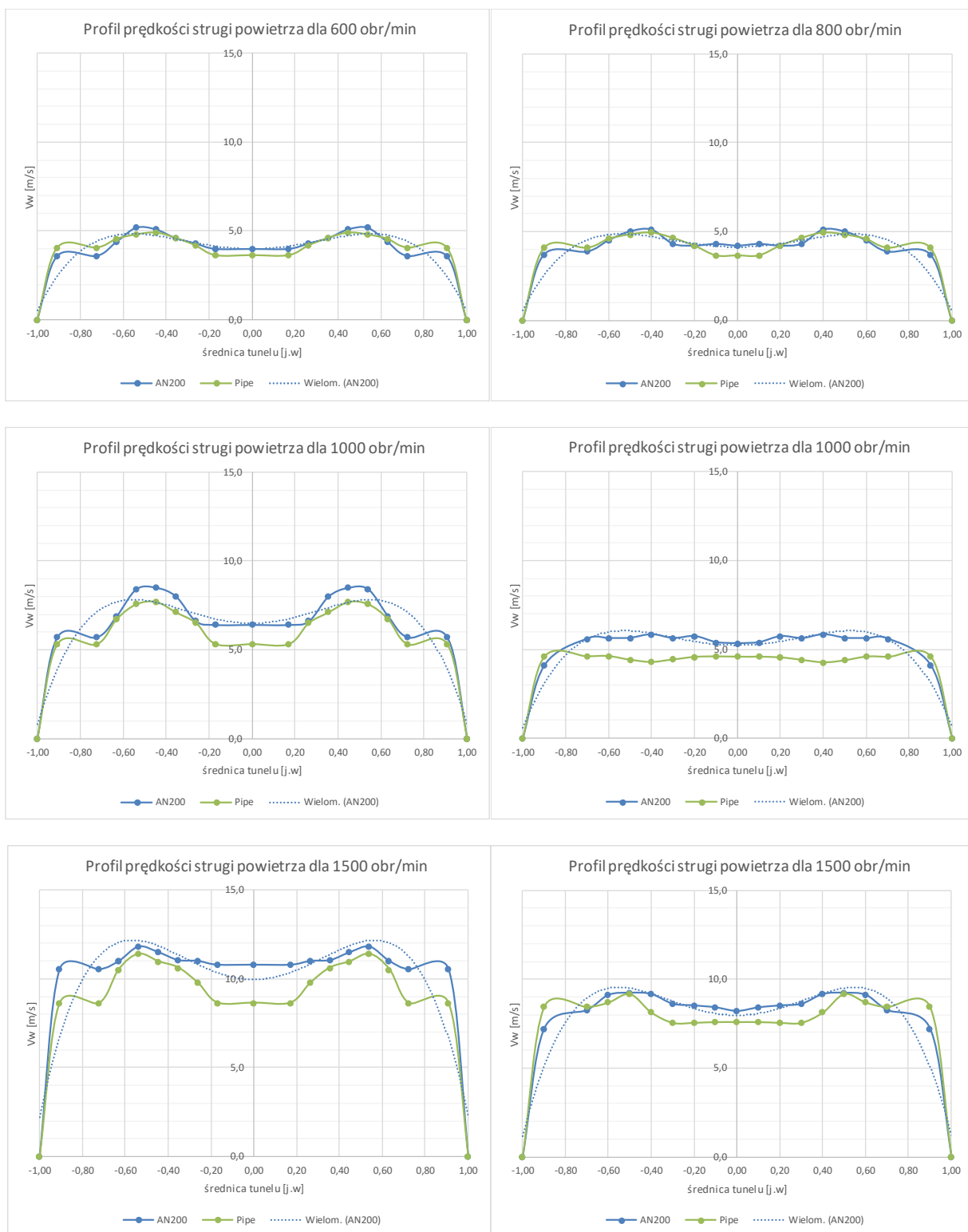


Rys. 13 Struktura systemu pomiarowego zastosowanego w tunelu aerodynamicznym

Na stanowisku badawczym zastosowano system z przetwornikiem pomiarowym klasy 310 firmy KIMO Instruments wraz zestawem sond i modułów pomiarowych. System umożliwia dokonanie precyzyjnego pomiaru i rejestracji ciśnienia statycznego oraz dynamicznego z zastosowaniem rurki Pitota, pomiaru przepływu strumienia strugi powietrza z zastosowaniem sondy wiatraczkowej oraz sondy termoporowej. Sygnały pomiarowe z przetwornika przesyłane są bezpośrednio do karty pomiarowej firmy Measurement COMPUTING połączonej z komputerem klasy PC. Zastosowanie komputera PC umożliwia dodatkowo sterowanie przemiennikiem częstotliwości zasilającym silnik wentylatora. Daje to dodatkowe

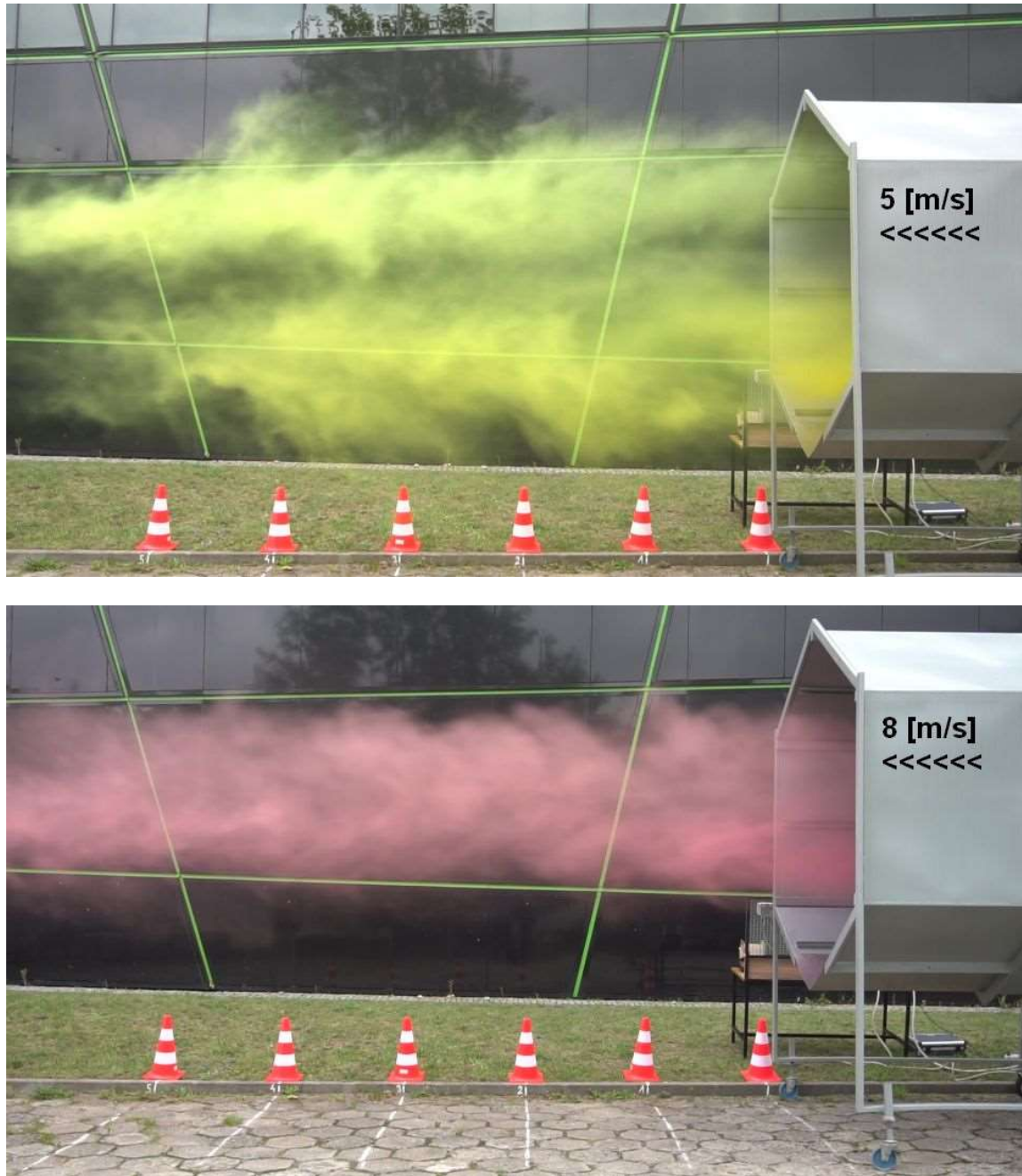
możliwość płynnej zmiany prędkości wiatru oraz zadawanie określonych profili zmian prędkości przepływu.

W celu analizy zmian parametrów użytkowych tunelu aerodynamicznego wykonano serię pomiarów wyznaczając kształty profili prędkości strugi powietrza bezpośrednio na wylocie tunelu dla różnych prędkości obrotowych silnika wentylatora głównego. Pomiary wykonano z zastosowaniem zakupionego systemu pomiarowego przed dokonaniem modernizacji konstrukcji tunelu oraz po zakończeniu prac modernizacyjnych. Pomiar przeprowadzono wyznaczając prędkości strumienia powietrza wzdłuż poziomej osi symetrii pola przekroju wylotu tunelu w 9 punktach pomiarowych wykorzystując do tego celu ręczny anemometr typu AN200 oraz rurkę Pitota. Prędkość wzdłuż ścianki tunelu mierzona była w sposób ciągły z zastosowaniem sondy wiatraczkowej SVH-100 oraz sondy termoporowej SVH-14. Wyniki badań w postaci wyznaczonych profili prędkości strumienia powietrza, dla różnych prędkości obrotowych wirnika wentylatora pokazano na Rys. 14. Dla porównania wyników kolejnych serii pomiarowych wykresy zostały zestawione parami dla pomiarów wykonanych przy prędkościach obrotowych wirnika wentylatora, odpowiednio 600, 1000 i 1500 obr/min. Po lewej stronie Rys. 14 przedstawiono wyniki zarejestrowanych profili prędkości dla tunelu przed modyfikacją strumienicy, natomiast po prawej stronie rysunku wyniki otrzymane po modyfikacji. Kolejne serie pomiarowe na wykresach oznaczono: „AN200” pomiar anemometrem ręcznym, „Pipe” pomiar rurką Pitota, „Wielom. (AN200)” aproksymacja wielomianowa charakterystyki serii „AN200”.



Rys. 14 Profile prędkości strumienia powietrza w świetle wylotu tunelu dla różnych prędkości obrotowych wirnika wentylatora: przed modernizacją tunelu (lewo), po modernizacji tunelu (pravo)

W trakcie realizacji badań wykonano próby polegające na wizualizacji strumienia strugi powietrza na wylocie tunelu z zastosowaniem różnokolorowych świec dymnych i rejestracji przepływów z wykorzystaniem kamery cyfrowej o szybkości rejestracji 120 klatek/s. Przykładowe wizualizacje dla dwóch wartości prędkości powietrza równych 5 m/s i 8 m/s zostały pokazane na zdjęciach na Rys. 15.



*Rys. 15 Wizualizacja strumienia przepływu powietrza na wylocie tunelu dla dwóch prędkości powietrza*

Na prezentowanych zdjęciach można zaobserwować równomierny sposób przepływu strugi powietrza na wylocie tunelu. Jest to sytuacja bardzo korzystana, świadcząca o uspokojonym charakterze przepływu powietrza.



Prace modernizacyjne dotyczące zmian konstrukcji tunelu aerodynamicznego, ze względu na trudności ze znalezieniem wykonawców oraz procedury przetargowe, były realizowane w okresie sierpień-wrzesień 2019. Fakt ten mocno utrudnił realizację badań eksperymentalnych z prototypem opracowanej konstrukcji dwuwirnikowej turbiny wiatrowej.

Na Rys. 16 zamieszczono kilka zdjęć z kolejnych etapów modernizacji konstrukcji tunelu. Na zdjęciach pokazano kolejno przed tunel demontażem, zabezpieczenie silnika wentylatora, przygotowanie konstrukcji do zabezpieczenia antykorozyjnego i montażu strumienicy oraz ekranów, konstrukcji po pracach malarskich.



*Rys. 16 Prace modernizacyjne przy konstrukcji tunelu (zdjęcia wybrane).*

Zrealizowane prace znacznie poprawiły użyteczność konstrukcji i jej parametry fizyczne.

## 5. Badania laboratoryjne prototypu konstrukcji generatora i turbiny

### a) Badanie generatora

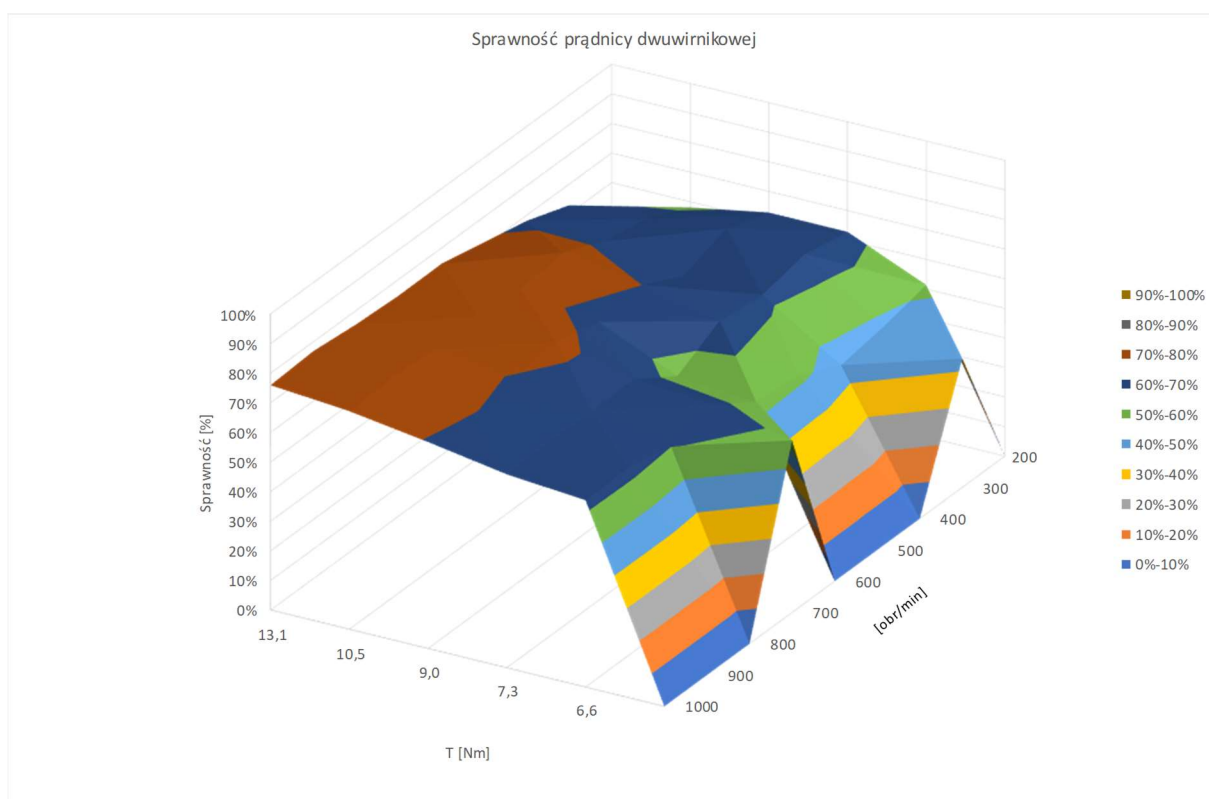
Badania prototypu konstrukcji generatora przeprowadzono na stanowisku hamowni elektromechanicznej w laboratorium. Na Rys. 17 pokazano widok generatora zamontowanego na stole hamowni elektromechanicznej w trakcie badań pod obciążeniem.



*Rys. 17 Generator na stanowisku prób laboratoryjnych*

Konstrukcja opracowanego generatora dwuwirnikowego wymaga, w celu uzyskania zakładanych parametrów elektrycznych, niezależnego doprowadzenia momentu napędowego do dwóch wałów maszyny. Każdy z wałów napędzany był niezależnie w przeciwnym kierunku w celu uzyskania zakładanej znamionowej prędkości względnej, pomiędzy twornikiem a magneśnicą, równej 1000 obr/min. Tak napędzany generator poddawano obciążeniu poprzez zmianę wartości rezystancji odbiornika podłączonego do zacisków stojana maszyny. Na stanowisku badawczym rejestrowano wartości mocy elektrycznej, prędkości obrotowe wałów, momenty elektromechaniczne. Na tej podstawie obliczono sprawność generatora w pełnym zakresie pracy. Wyniki uzyskane na stanowisku prób pokazano na Rys. 18 gdzie zamieszczono wykres przebiegu sprawności generatora w funkcji zmiany prędkości obrotowej oraz momentu obciążenia.

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły przejęte na etapie założeń projektowych wartości znamionowe mocy i napięcia. W trakcie prób długotrwałych nie przekroczono dopuszczalnych poziomów temperatury wewnątrz konstrukcji generatora.



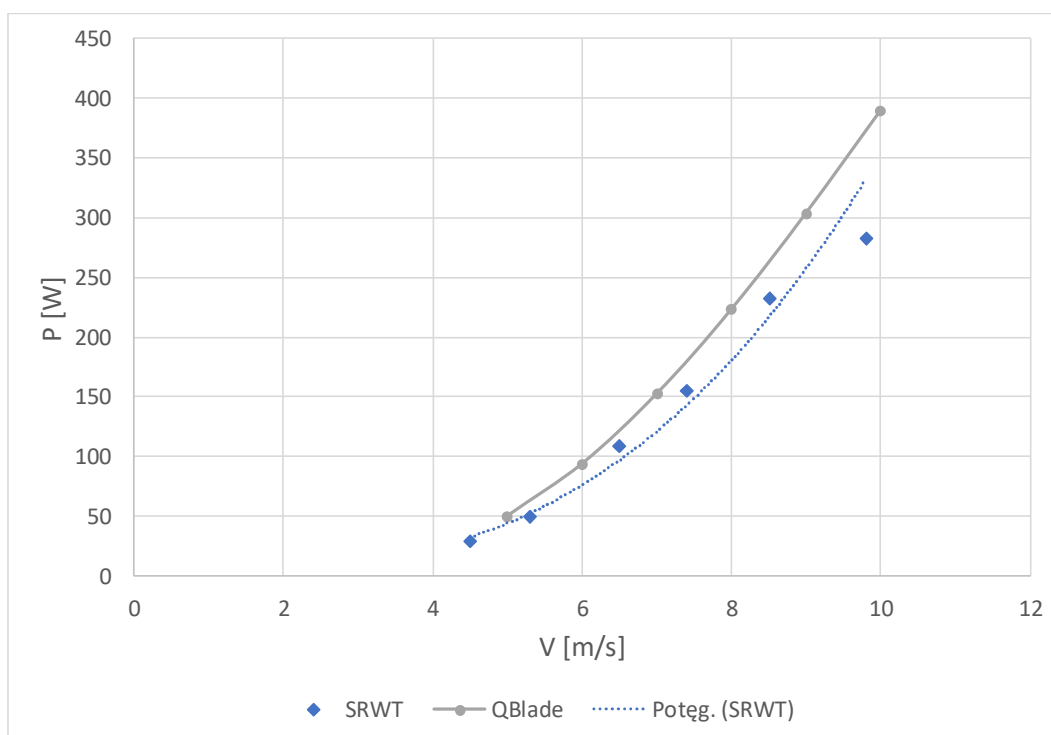
*Rys. 18 Wykres sprawności generatora tarczowego*

W związku z rozpoczęciem procedury uzyskania ochrony patentowej na opracowaną konstrukcję generatora i wymogi formalne związane z procedurą uzyskania ochrony, otrzymane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych generatora nie były nigdzie publikowane.

Po uzyskaniu ochrony patentowej wyniki badań zostaną opublikowane w wybranych czasopismach naukowych z listy JCR (ang. Journal Citation Reports) i będą istotnym elementem rozwoju naukowego dla uczestników projektu.

## b) Badanie turbiny wiatrowej

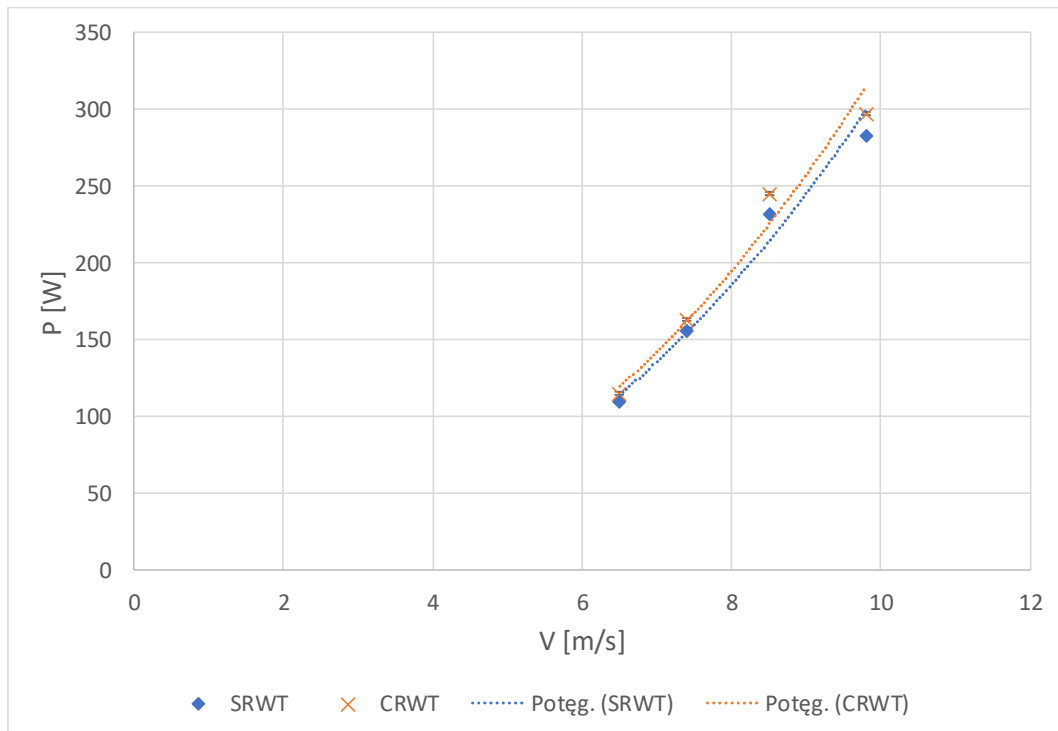
Badania laboratoryjne dwuwirnikowej turbiny wiatrowej mogą być realizowane dla różnych konfiguracji geometrycznych związanych ze zmienną ilością łopat 2, 3 lub 4 łopaty w poszczególnych wirnikach, odległością pomiędzy wirnikami oraz zmianami punktów pracy poszczególnych wirników (zmiana kąta natarcia łopat). Z uwagi na dużą liczbę konfiguracji badawczych konstrukcji turbiny plan badań laboratoryjnych ograniczono do niezbędnego minimum. Zakres badań obejmował analizę działania turbiny wiatrowej w konfiguracji pojedynczego wirnika trójłopatego oraz podwójnego wirnika trójłopatego. Badanie dotyczyło wyznaczenia krzywych mocy w funkcji zmian wiatru wymuszanych na wylocie tunelu aerodynamicznego. Badania laboratoryjne turbiny wiatrowej rozpoczęto od analizy parametrów aerodynamicznych dla turbiny z wirnikiem głównym (pierwszym) wirnik drugi został zdemontowany. Wymuszano zmianę prędkości strumienia powietrza w zakresie od 4 do 10 [m/s] i mierzono maksymalną możliwą do uzyskania w określonej konfiguracji geometrycznej (kąta natarcia łopat) moc na zaciskach generatora. Uzyskane wyniki badania zostały zaprezentowane w formie graficznej na Rys. 19 w postaci krzywej mocy wyjściowej w funkcji zmian prędkości wiatru. Wyniki pomiarowe zaznaczono serią SRWT, natomiast seria QBlade odnosi się do wyników symulacyjnych uzyskanych w programie QBlade v0.963.



Rys. 19 Charakterystyka mocy wyjściowej turbiny z pojedynczym wirnikiem w funkcji prędkości wiatru

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie mocy turbiny dwuwirnikowej. Na potrzeby eksperymentu odległość pomiędzy oboma wirnikami trójłopatowymi ustalono na połowę średnicy wirnika równej 0,7 m. Następnie zmieniano prędkość wiatru w zakresie od 4 do 10 [m/s] i mierzono maksymalną możliwą do uzyskania w określonej konfiguracji geometrycznej (wartość kąta natarcia łopat 0°) moc na zaciskach

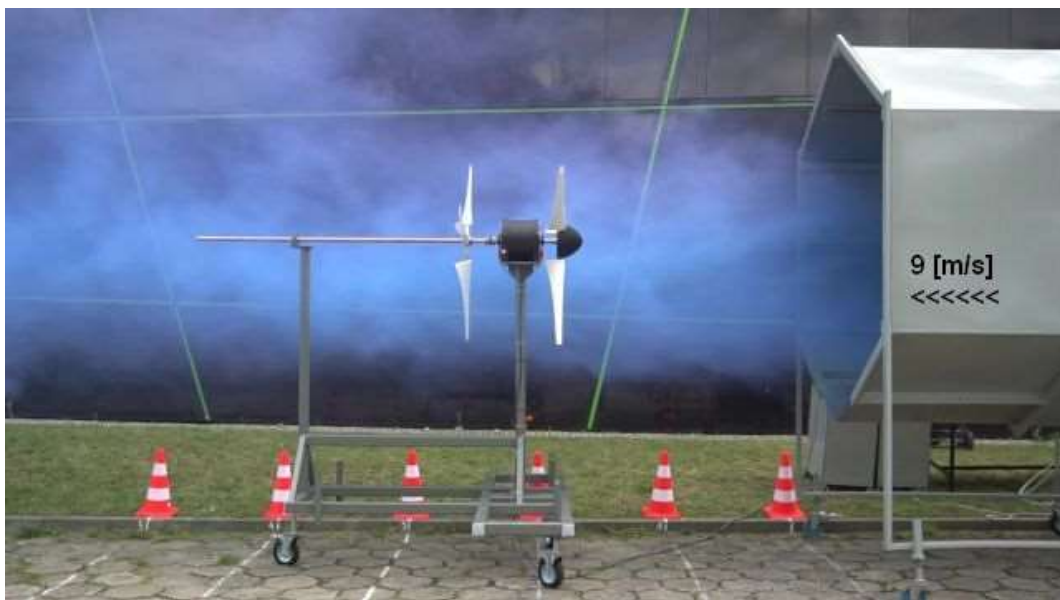
generatora. Wyniki badania zaprezentowano na Rys. 20. Dla porównania otrzymanych wyników zmian mocy wyjściowej na charakterystyce zestawiono serię pomiarową dla turbiny w konfiguracji jednowirnikowej SRWT oraz serię pomiarową dla konfiguracji dwuwirnikowej CRWT.



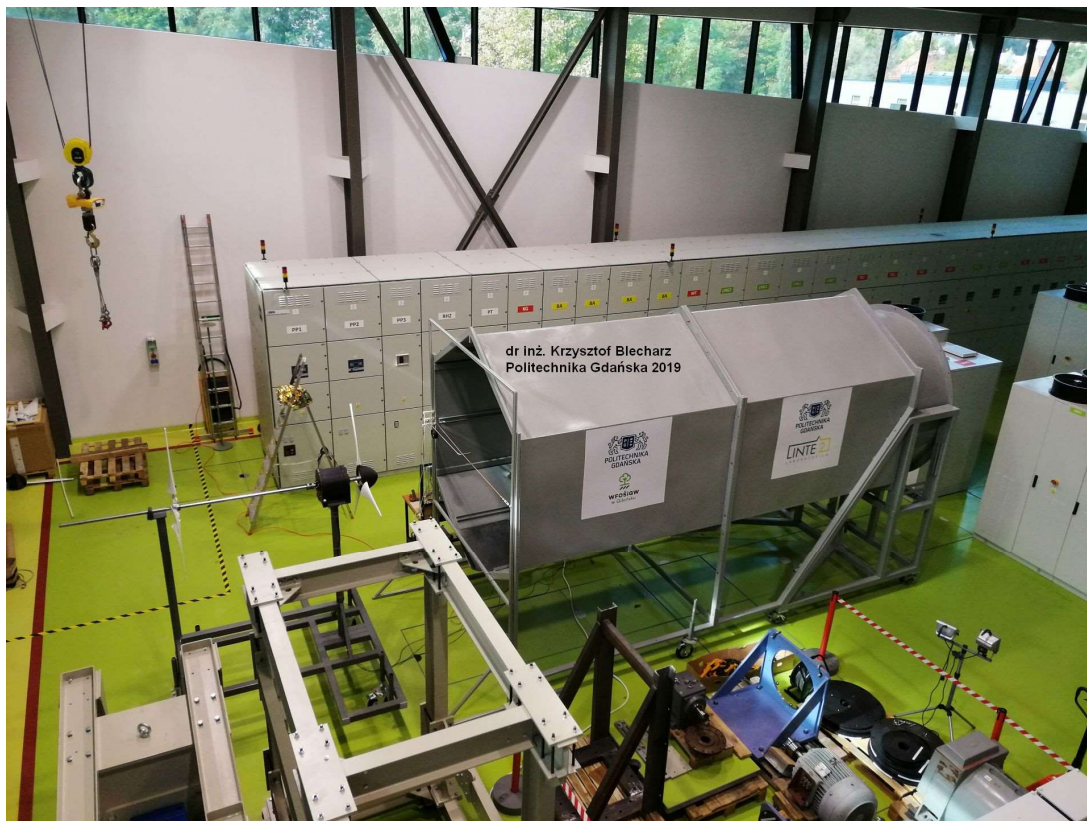
Rys. 20 Charakterystyka mocy wyjściowej turbiny dwuwirnikowej w funkcji prędkości wiatru

Wstępne wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły wzrost wydajności przetwarzania energii kinetycznej wiatru dla turbiny dwuwirnikowej na poziomie +5% w stosunku do turbiny jednowirnikowej. Należy zaznaczyć, że otrzymane wyniki badań laboratoryjnych były przeprowadzone tylko dla dwóch wybranych konfiguracji, co przy analizie otrzymanych wyników i uwzględnieniu pozostał konfiguracji turbiny może poprawić otrzymane rezultaty.

Jednym z dodatkowych etapów badań laboratoryjnych była wizualizacja przepływów dla wybranych konfiguracji turbiny z wykorzystaniem zakupionych różnokolorowych świec dymnych. Wprowadzenie intensywnego dymu w miejscu zasysania przez wentylator główny w tunelu aerodynamicznym oraz zastosowanie rejestracji obrazu z wykorzystaniem kamery szybkiej umożliwiło obserwacje zmian prędkości strumienia powietrza oraz powstałych turbulencji w torze pomiarowym. Na Rys. 21 pokazano zdjęcia zarejestrowane dla dwóch przypadków konfiguracji geometrycznej układu oraz dwóch różnych prędkości wiatru równych 5 i 9 m/s. Pokazane zdjęcia stanowią wybrane klatki wysokorozdzielczych filmów zarejestrowanych w czasie badań. Na zarejestrowanych filmach można zaobserwować w trybie odtwarzania w zwolnionym tempie szczegóły związane z powstawaniem turbulencji i zawirowań w obszarach za wirnikami turbiny. Zaobserwowane zjawiska potwierdzają wyniki badań symulacyjnych otrzymanych w programie do analizy przepływów wykorzystywanym na etapie badań symulacyjnych.



*Rys. 21 Badanie prototypu turbiny wiatrowej w konfiguracji jedno i dwuwirnikowej*



Rys. 22 Turbina na stanowisku badawczym w laboratorium Linte^2

## 6. Podsumowanie i wnioski

Prace badawczo-rozwojowe w zakończonym projekcie realizowano zgodnie z przyjętym w karcie projektu harmonogramem prac. Wszystkie etapy projektu zostały zrealizowane w wyznaczonym terminie zakończenia projektu. Budżet projektu nie został przekroczony. Z dostępnych środków finansowych zakupiono niezbędny sprzęt oraz akcesoria i przyrządy pomiarowe ujęte w planowanym harmonogramie rzeczowo finansowym. Niewielkie odstępstwa od przyjętego harmonogramu rzeczowo finansowego były wynikiem prac badawczych i konstruktorskich i nie wpłynęły na przekroczenie planowanych kosztów projektu.

W wyniku prac rozwojowych opracowano konstrukcję dwuwirnikowej turbiny wiatrowej oraz generator o ruchomej magniesnicy i tworniku. Całość urządzeń wytworzonych i zakupionych w ramach projektu oraz tunel aerodynamiczny, będącym na wyposażeniu Politechniki Gdańskiej, umożliwił zbudowanie specjalistycznego stanowiska badawczego. Opracowane stanowisko badawcze znacznie rozszerzyło bazę sprzętową WEIA i w przyszłości będzie mogło być wykorzystywane do dalszych badań dotyczących małych turbin wiatrowych. Wyniki uzyskiwane w trakcie prac badawczych były na bieżąco publikowane w czasopiśmie naukowych oraz zaprezentowane na dwóch konferencjach naukowych. Duża liczba wyników badań nie została jeszcze opublikowania w związku z rozpoczęciem procedury

uzyskania ochrony patentowej na opracowaną konstrukcję generatora i wymogi formalne związane z procedurą uzyskania ochrony. Duża ilość niepublikowanych wyników badań stwarza możliwości przygotowania kolejnych publikacji po uzyskaniu ochrony patentowej.

Wyniki wstępnych badań laboratoryjnych pokrywają się z uzyskanymi wynikami badań symulacyjnych dla opracowanej turbiny dwuwirnikowej. W przypadku zastosowania rozwiązania turbiny z dwoma wirnikami obracającymi się przeciwsośnie moc zmierzona na zaciskach generatora wzrosła w przybliżeniu o blisko 5% w stosunku do jednowirnikowej turbiny wiatrowej o takich samych wymiarach geometrycznych. Otrzymane wyniki badań i obserwacje działania układu wskazują na możliwość dalszego wzrostu sprawności przetwarzania energii przez turbinę dwuwirnikową o kolejne kilka punktów procentowych w przypadku optymalizacji konfiguracji pracy turbiny.

Zestawienie wszystkich publikacji oraz wystąpień, a także zgłoszenie patentowe zostało zamieszczone w załączniku A.

W związku z rozpoczęciem procedury uzyskania ochrony patentowej na opracowaną konstrukcję generatora i wymogi formalne związane z procedurą uzyskania ochrony, otrzymane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych generatora nie były nigdzie publikowane.



## Załącznik A. (Spis publikacji)

### Zgłoszenie patentowe

Z uwagi na ciekawą i innowacyjną konstrukcję mechaniczną generatora uruchomiono procedurę zgłoszenia patentowego na zastosowane rozwiązania techniczne. Procedura zgłoszenia patentowego obecnie (numer zgłoszenia PG 24/19 data zgłoszenia 24.05.2019) jest w toku. Numer zgłoszenia wynalazku w Urzędzie Patentowym RP to P.431142.

Wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych zostały opublikowane w czasopismach naukowych oraz zaprezentowane na konferencjach branżowych, których spis zamieszczono poniżej:

### Referat konferencyjny.

Blecharz K. Prezentacja wyników badań, uzyskanych w trakcie trwania projektu, na konferencji naukowej: First International Conference on Materials, Environment, Mechanical and Industrial Systems ICMEMIS'19, Algieria 2019. Kierownik projektu zaproszony jako Plenary Speaker wygłosił godzinny referat na temat: „Design And Modelling Aspects Of Small Wind Turbines”,

(<http://www.univ-djelfa.dz/icmemis19/>)



dr inż. Krzysztof Blecharz prezentujący referat na konferencji naukowej Djelfa 2019, Algieria

### Publikacje:

- M. Pacholczyk , K. Blecharz , D. Karkosiński: „Modelowanie turbiny wiatrowej z dwoma przeciwnie obracającymi się wirnikami”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 57, 2017.
- Pacholczyk M., Blecharz K.: „Analiza aerodynamiczna łopat na przykładzie projektu dwuwirnikowej turbiny wiatrowej małej mocy”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 61, 2018, doi: 10.32016/1.61.13
- Pacholczyk M., Blecharz K., Karkosiński D.: “Numerical Investigation on the Performance of a Small Counter-Rotating Wind Turbine”, Proceedings of International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE19), Wrocław 2019 (<http://www.asee.pwr.edu.pl/>)

- Pacholczyk M., Blecharz K., Karkosiński D.: “Study of the Influence of an Axial Distance Between Rotors on Performance of a Small Counter-Rotating Wind Turbine”, Proceedings of 3rd international conference on energy research and technology (ICERT'19), Lisbon 2019, Portugal. (<https://icertseries.com/>) *Autorzy uhonorowani wyróżnieniem za najlepszy artykuł zaprezentowany na konferencji.*



Doktorant mgr inż. Michał Pacholczyk jako uczestnik konferencji naukowej w Lizbonie, Portugalia 2019. Prezentowany przez doktoranta referat otrzymał wyróżnienie za najlepszy artykuł konferencyjny.

## Spis Załączników

- A. Spis publikacji z załączonymi artykułami
- B. Projekt generatora
- C. Projekt modyfikacji tunelu aerodynamicznego
- D. Projektu piasty umożliwiającej precyzyjne nastawianie kąta natarcia łopat wirnika w małej elektrowni wiatrowej - dokumentacji techniczna.